

Pot protonov v snovi

Peter Jevšenak

Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje

Izvleček

Pri zdravljenju tumorjev se v svetu vedno bolj uveljavlja metoda, pri kateri tumor obsevamo s protoni. Takšno zdravljenje je veliko dražje od bolj poznane zdravljenja z rentgenskimi žarki, a hkrati učinkovitejše. Njegova prednost je primernejša globinska dozna porazdelitev, ki manj poškoduje tkivo okrog tumorja. V tej raziskavi se je preučevala pot protonov v snovi, predvsem, kako globoko prodre in koliko se razprši snop izstreljenih protonov z enako začetno kinetično energijo. V ta namen je bil narejen računalniški program, ki simulira obnašanje protonov v izbrani snovi. Najprej se je ugotavljala odvisnost dosega protonov v snovi od njihove začetne energije, nato smo iskali snov, ki nas najbolj varuje pred protoni, za konec pa smo obravnavali še snovi, ki sestavljajo človeško telo: kosti, mišice in vodo.

Ključne besede: protonsko obsevanje, ustavljalna moč protonov, doseg snopa protonov, Braggov vrh, Gaussova porazdelitev

Path of Protons in Matter

Abstract

In the treatment of tumours throughout the world, the method of irradiating the tumour with protons is becoming increasingly widespread. Such treatment is much more expensive than the traditional treatment with x-rays, but is also more effective. Its advantage is a more suitable depth dose distribution, which causes less damage to the tissue surrounding the tumour. The present research study examined the path of protons in matter, especially how deeply the fired beam of protons having the same initial kinetic energy penetrates and how much it disperses. For this purpose, a computer program was designed that simulates the behaviour of protons in the selected matter. Firstly, it was determined how the range of protons in matter depends on their initial energy; then, we searched for matter that best protects us against protons; in the end, we discussed the matter that makes up the human body: bones, muscles and water.

Keywords: proton irradiation, proton stopping power, range of proton beam, Bragg peak, Gaussian distribution

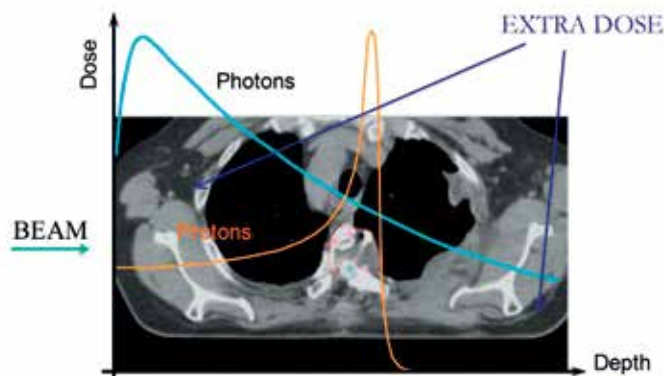
1 Uvod

Pri zdravljenju tumorjev se uporabljajo trije pristopi: sistemsko zdravljenje, kirurško zdravljenje in zdravljenje z obsevanjem. Slednje se izvaja s sevanjem visoko energijskih fotonov. Pri tem načinu zdravljenja so pomembne čim primernejše energijske izgube oz. dozna porazdelitev. Snopu fotonov energija po vstopu v snov eksponentno pada (glej sliko 1), zato fotoni vplivajo tudi na zdravo tkivo pred in za tumorjem. Zaradi tega se zdravniki odločajo za obsevanje z nižjimi energijami fotonov, a z več različnih strani s presekom sevalnih žarkov na tumorju. Tako vseeno zdravimo tumor, tkivo okrog njega pa je manj poškodovano (vir 8).

Ta način zdravljenja je bil prvič uporabljen ob koncu 19. stoletja (meni se, da je to storil Američan Emil Grubbe leta 1896). Točno 50 let kasneje (leta 1946) je Robert R. Wilson, prvi direktor Fermilaba, objavil članek, kjer je predlagal zdravljenje tumorjev z obsevanjem s protoni, prvi praktični poskusi uporabe pa segajo v petdeseta leta 20. stoletja (Berkeley Hills (ZDA), leta 1954, in Uppsala (Švedska), leta 1957) (vira 3, 12).

Prednost takšnega načina zdravljenja je primernejša globinska dozna porazdelitev. Protonom se namreč dozna porazdelitev po vstopu v snov povečuje, dokler ne doseže maksimuma, tik preden se protoni ustavijo, nato pa pade na nič (glej sliko 1). Maksimum takšne dozne porazdelitve imenujemo Braggov vrh (vir 7).

Na ta način sevanje s protoni veliko manj poškoduje tkivo okrog tumorja kot obsevanje s fotoni. A po podatkih iz leta 2017 je v svetu v klinični rabi le 79 centrov za protonsko terapijo, od tega 27 v ZDA, 18 na Japonskem, preostali pa v Avstraliji in Zahodni Evropi (vir: Delo, 28. 2. 2019). Največji problem te metode zdravljenja je cena, saj so naprave za zdravljenje s protonskim obsevanjem približno stokrat dražje od rentgenskih cevi.



Slika 1: Primerjava dozne porazdelitve glede na globino med fotoni rentgenske svetlobe in protoni (foto: vir 7).

V tej raziskavi preučujemo obnašanje protonov v snovi, ki jo obsevamo s tankim, natančno usmerjenim protonskim snopom, kjer imajo na začetku vsi protoni enako kinetično energijo. Predvsem nas je zanimalo, kako izgubljajo energijo, kakšen je njihov doseg, kje je Braggov vrh, koliko se snop razprši ipd.

V Sloveniji (še) ni protonskega pospeševalnika, kjer bi lahko opravljali meritve, zato smo napisali računalniški program, ki simulira obnašanje protonov v izbrani snovi. Protoni namreč izgubljajo energijo zaradi množice elektromagnetnih in jedrskih interakcij z elektroni in atomskimi jedri v snovi. Zato lahko izgubo energije na enoto dolžine obravnavamo statistično in ni potrebno natančno fizikalno poznavanje vseh mehanizmov in interakcij.

Z ustvarjenim računalniškim programom smo nato iskali odgovore na naslednja vprašanja:

1. kako je doseg snopa protonov v snovi odvisen od začetne energije protonov,
2. ali nas pred protoni najbolje varuje svinec,
3. kako je z dosegom protonov v snoveh, ki tvorijo človeško telo – kosti, mišice in voda.

2 Matematični model

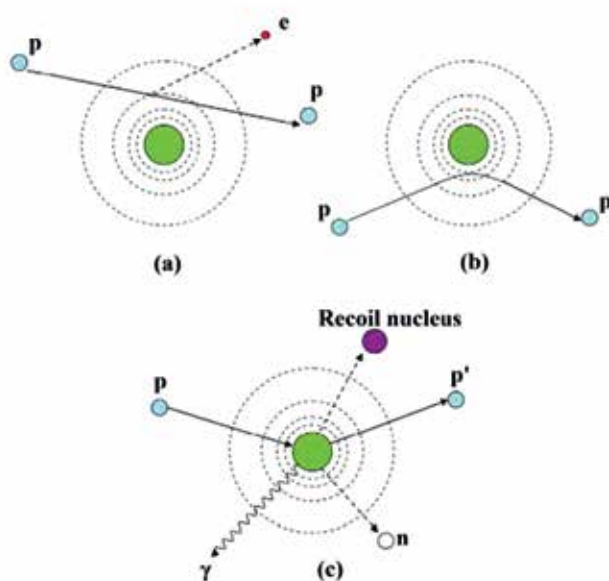
2.1 Interakcije protonov

Glavne interakcije protonov v snovi so: elektromagnetne (Coulombove) interakcije z elektroni, elektromagnetne interakcije z jedri ter jedrske interakcije. Protoni večino energije izgubijo v neelastičnih interakcijah z vezanimi elektroni v snovi. Pri tem protoni vzbujajo in ionizirajo atome snovi. Pri elastičnem sipanju na jedrih, večinoma preko elektromagnetne, lahko pa tudi preko močne interakcije, se protonom spremeni smer. Občasno pa lahko proton konča svojo pot z direktnim trkom v jedro, pri čemer se sprostijo sekundarni delci. Protoni lahko teoretično tudi zavorno sevajo, vendar je to sevanje, z dozimetričnega vidika, zanemarljivo (slika 2, vir 6).

Ker protoni v snovi izgubljajo energijo, je normalno pričakovati, da se enkrat ustavijo. Če bi protoni v snovi zvezno izgubljali energijo, bi bil doseg protonov z isto energijo v izbrani snovi enak. Vendar meritve kažejo, da ni tako. Interakcije protonov s snovjo so statistične narave tako po izgubi energije kot po smeri gibanja. Dva identična protona ne bosta doživela enakega števila trkov in ne enake izgube energije pri posameznem trku, zato se ne bosta ustavila na enaki globini. Protoni izgubijo energijo v zelo velikem, ampak končnem številu posameznih interakcij. Pri vsaki od teh interakcij energijske izgube variirajo. Tej statistični naravi energijskih izgub pravimo energijsko stresanje. Posledica energijskega stresanja je torej tudi stresanje po globini. Doseg je tako definiran kot globina snovi, do katere se ustavi polovica vpadnih

Prednost takšnega načina zdravljenja je primernejša globinska dozna porazdelitev. Protonom se namreč dozna porazdelitev po vstopu v snov povečuje, dokler ne doseže maksimuma, tik preden se protoni ustavijo, nato pa pade na nič.

Glavne interakcije protonov v snovi so: elektromagnetne (Coulombove) interakcije z elektroni, elektromagnetne interakcije z jedri ter jedrske interakcije.



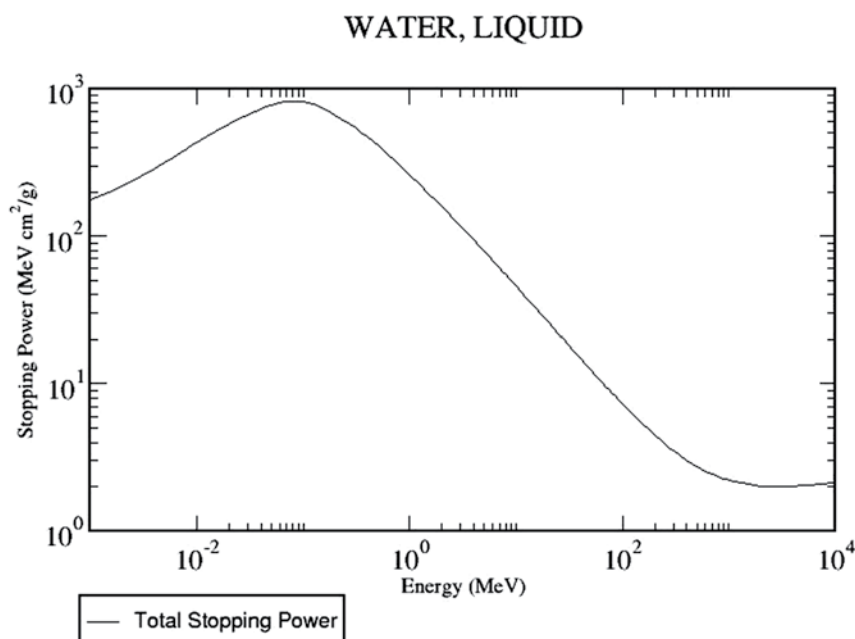
Dva identična protona ne bosta doživela enakega števila trkov in ne enake izgube energije pri posameznem trku, zato se ne bosta ustavila na enaki globini.

Slika 2: Shematska predstavitev glavnih interakcij protonov v snovi: (a) neelastične elektromagnetne interakcije z vezanimi elektroni, (b) elastično sipanje na jedru preko elektromagnetne ali močne interakcije, (c) neelastične jedrske interakcije, pri čemer nastanejo sekundarni delci (p: proton, e: elektron, n: nevtron, γ: gama žarek) (foto: vir 6).

protonov (vir 4). Energijske izgube protonov v vodi, v odvisnosti od njihove kinetične energije, so prikazane na sliki 3. S slike razberemo, da v vodi energijo najhitreje izgubljajo protoni s kinetično energijo okrog 100 keV. Treba pa se je zavedati, da krivulja na sliki 3 predstavlja samo povprečne vrednosti, dejanske izgube pa so razpršene okoli teh vrednosti zaradi energijskega stresanja po Gaussovi porazdelitvi, kjer kvadrat standardne deviacije podaja enačba

$$\sigma_0^2 = 0,1569 \rho \frac{Z}{A} x. \quad (1)$$

V enačbi (1) je ρ gostota snovi, Z vrstno število elementa, A atomska masa in x debelina obsevanega materiala.



Slika 3: Energijske izgube protonov v vodi v odvisnosti od njihove kinetične energije (vir 10).

Graf energijskih izgub protonov v odvisnosti od njihove kinetične energije, kot ga vidimo na sliki 3 za vodo, lahko določimo za vsako snov po Bethe-Blochovi formuli (vir 4). Energijske izgube na enoto dolžine z enoto MeV/cm so močno odvisne od gostote obsevane snovi, zato se pogosto podajajo vrednosti, deljene z gostoto: $(\text{MeV/cm}) / (\text{g/cm}^3) = \text{MeV cm}^2/\text{g}$, kar vidimo na sliki 3 kot enoto na ordinatni osi. Izračunane vrednosti za večino snovi so že tabelirane in podatke lahko najdemo v literaturi, ki navaja lastnosti snovi. Natančnost se ocenjuje na nekaj odstotkov.

Protoni pri potovanju skozi snov doživijo tudi veliko število sipanj na jedrih. Sipajo se večinoma prek elektromagnetne interakcije (večkratno Coulombovo sipanje), interakcije prek močne jedrske sile so redke. Če zanemarimo majhno verjetnost za sipanje pod velikim kotom pri posameznem sipanju, potem je porazdelitev približno Gaussova: v povprečju se protonom smer ne spremeni, razpršenost pa modeliramo po Gaussu, kjer se koren povprečnega kvadrata (RMS) sipalne kota izračuna po Highlandovi formuli (vir 4):

$$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = z \frac{20 [\text{MeV}/c]}{p\beta} \sqrt{\frac{x}{L_{\text{rad}}}} \left(1 + \frac{1}{9} \log \frac{x}{L_{\text{rad}}} \right), \quad (2)$$

kjer je Z naboj delca, p gibalna količina delca, x debelina materiala, L_{rad} radiacijska dolžina materiala (tabelirana, vir 10) in $\beta = v/c$, kjer je v hitrost delca in c svetlobna hitrost. Highlandova formula je empirična in njena natančnost se ocenjuje na približno 5 %, v snovi s težkimi elementi pa je natančnost 10–20 %.

Če porazdelitev kotov v treh dimenzijah projiciramo na ravnino, v kateri leži osnovna trajektorija, dobimo tudi približno Gaussovo porazdelitev, kjer sta povprečna kvadrata sipalnih kotov povezana z enačbo

$$\langle \theta_x^2 \rangle = \langle \theta^2 \rangle : 2. \quad (3)$$

Učinke ionizirajočega sevanja na tkiva oz. učinkovitost zdravljenja ocenjujemo na podlagi absorbirane doze. Doza je definirana kot deponirana energija na enoto mase v določeni točki:

$$D = \frac{dW}{dm} \quad (4)$$

in po mednarodnem sistemu enot (SI) je osnovna enota za dozo Gray (1 Gy = 1 J/kg).

Ker se energijske izgube povečujejo, ko se protoni ustavljajo, se pri globinski dozni porazdelitvi snopa protonov (ali drugih težjih nabitih delcih) pojavi značilen vrh, imenovan Braggov vrh (slika 1: na grafu dozne porazdelitve protonov se lepo vidi tudi Braggov vrh).

2.2 Gaussova funkcija

V našem modelu se morajo nekatere energijske vrednosti in velikosti kotov malo spremeniti, tj. stresti po normalni (Gaussovi) porazdelitvi. Gaussova funkcija prikazuje normalno porazdelitev, ki je prikazana s t. i. Gaussovo krivuljo in ima značilno zvonasto obliko (slika 4). Funkcija je zapisana z enačbo

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

pri čemer je $f(x)$ relativna frekvenca količine x , μ povprečna vrednost, σ pa standardna deviacija. Krivulja je simetrična na premico $x = \mu$, kjer tudi doseže vrh.

Če predpostavimo, da je delež vseh opazovanih statističnih enot enak 1, potem je tudi ploščina območja med abscisno osjo in Gaussovo krivuljo enaka 1. Zato lahko vse normalne porazdelitve zapišemo kot standardizirano normalno porazdelitev z uvedbo spremenljivke z . Standardizirana normalna porazdelitev ima povprečno vrednost enako 0, standardno deviacijo enako 1, vsaka vrednost z (na abscisni osi) pa je podana v obliki

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma}. \quad (6)$$

Iz Gaussove funkcije lahko tudi izračunamo frekvenco vrednosti (tj. kako pogosto se podatek pojavi), kar je zelo uporabno v statistiki (vir 1). Za računanje frekvence vrednosti uporabljamo razne računalniške programe, v tej raziskavi pa je bil uporabljen program GeoGebra (slika 4).

Protoni pri potovanju skozi snov doživijo tudi veliko število sipanj na jedrih. Sipajo se večinoma prek elektromagnetne interakcije (večkratno Coulombovo sipanje), interakcije prek močne jedrske sile so redke.

Učinke ionizirajočega sevanja na tkiva oz. učinkovitost zdravljenja ocenjujemo na podlagi absorbirane doze. Doza je definirana kot deponirana energija na enoto mase v določeni točki:

2.3 Relativistični protoni

Ko se hitrost protonov približa svetlobni hitrosti ($c = 299\,792\,458$ m/s), je treba za opis gibanja uporabiti relativistično mehaniko. Zanima nas predvsem zveza med kinetično energijo in hitrostjo protona. Klasična enačba

$$W_k = \frac{mv^2}{2} \text{ se transformira v enačbo } W_k = W_0(\gamma_0 - 1), \text{ kjer je } \gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

W_0 predstavlja lastno energijo protona (938.3 MeV), γ_0 pa je relativistični faktor (vir 5).

Za $v \ll c$ je relativistični faktor 1, pri velikih hitrostih pa začne naraščati in v primeru $v = c$ bi postal neskončen. Klinično zanimivi protoni imajo kinetične energije do 250 MeV (vir 8). V spodnji tabeli je prikazanih nekaj številčnih vrednosti glede na kinetično energijo protona.

Tabela 1: Vrednosti relativističnega faktorja (γ_0) ter razmerje hitrosti protona in svetlobne hitrosti (β) v odvisnosti od kinetične energije protonov (W_k).

W_k [MeV]	γ_0	$\beta = v/c$
20	1.02	0.20
100	1.10	0.43
250	1.27	0.61

Ko se hitrost protonov približa svetlobni hitrosti ($c = 299\,792\,458$ m/s), je treba za opis gibanja uporabiti relativistično mehaniko.

3 Metode dela

V raziskavi smo se omejili na protone do kinetične energije 100 MeV, ki jih v približku še lahko štejemo za nerelativistične. Vpliv relativističnih popravkov na uporabljene formule do te energijske meje je še v okviru same nenatančnosti (empiričnih) formul. Pot protonov v snovi je tridimenzionalna, lahko pa problem nekoliko poenostavimo, če poti projiciramo na ravnino, v kateri leži osnovna trajektorija. Tako se v računalniškem programu določa projicirana pot v dveh dimenzijah (2D).

V raziskavi smo se omejili na protone do kinetične energije 100 MeV, ki jih v približku še lahko štejemo za nerelativistične.

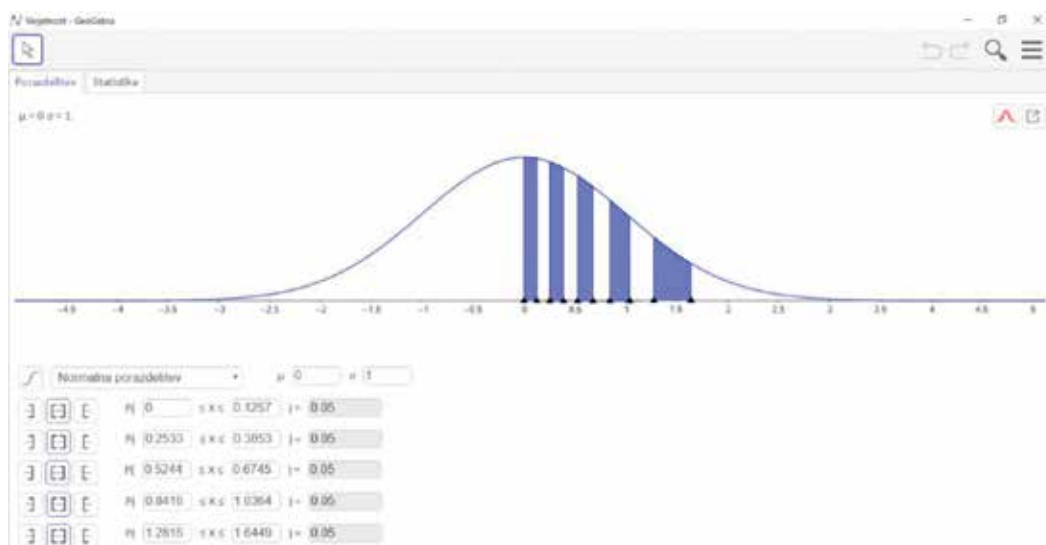
3.1 Računalniški program

Programirali smo v okolju Visual Studio v programskem jeziku C++ z dodanimi knjižnicami SFML za grafiko.

Poti protonov smo določali v šestih različnih snoveh: voda, svinec, platina, volfram, kosti in mišice. Podatki, ki smo jih morali poiskati za vsako snov, so: razmerje Z/A in radiacijska dolžina (L_{rad}) za enačbo (1), gostota snovi ρ za enačbo (2) ter izgube energije protona pri njegovi trenutni energiji na enoto dolžine (t. i. ustavljalna moč protonov oz. »proton stopping power«). Vir za ustavljajno moč protonov je bila spletna stran NIST (vir 10), druge potrebne podatke pa smo pridobili na spletni strani PDG (vir 11).

Pri preverjanju dosega protonov v snovi so bile energije protonov od 30 MeV do 100 MeV, pri drugih simulacijah pa 100 MeV. V sredino izbrane snovi smo usmerili snop protonov širine 2 mm. Velikostni red dosega protonov z začetno energijo do 100 MeV v trdnih snoveh in kapljevinah je nekaj centimetrov. Vzeli smo 2D-snov dolžine 10 cm in širine 2,5 cm in to razbili na mrežo kvadratkov (400 x 100) s stranico 0,025 cm. Prečkanje kvadrata pomeni en korak pri računanju izgube energije protona. Računalniški program v vsakem koraku najprej poišče ustavljajno moč protonov za trenutno energijo protona. To vrednost nato naključno spremenimo – stresemo po Gaussovi porazdelitvi. Pri tem si pomagamo z gostoto izbire. Standardizirano Gaussovo porazdelitev smo razdelili na stolpce z enako ploščino. Meje teh stolpcev so zato gosteje posejane blizu ordinatne osi, kjer ima funkcija vrh, bolj oddaljene pa so bolj narazen (slika 4). Meje stolpcev predstavljajo števila, med katerimi program naključno izbira.

Poti protonov smo določali v šestih različnih snoveh: voda, svinec, platina, volfram, kosti in mišice.



Slika 4: Vrednosti, med katerimi izbira program. Vsi stolpci imajo enake ploščine (0,05), tudi neobarvani stolpci med njimi imajo enake ploščine. Meje teh stolpcev (0, 0'1257, 0'2533 ... 1'6449) so bile zaokrožene, med temi vrednostmi je izbiral program. Slika je vzeta iz programa GeoGebra.

Ker je standardna deviacija neodvisna od energije oziroma hitrosti protona, pride pri nižjih energijah relativno gledano do večjega stresanja.

V enačbi (6) naključno izbrano število predstavlja z , standardno deviacijo σ dobimo po enačbi (1), μ je (povprečna) ustavljalna moč protonov, x pa njena stresena vrednost. Ker je standardna deviacija neodvisna od energije oziroma hitrosti protona, pride pri nižjih energijah relativno gledano do večjega stresanja. Podobno določimo tudi stresanje po kotu, le da tam standardno deviacijo predstavlja koren povprečnega kvadrata sipalnega kota, ki ga določimo po enačbi (2), srednja vrednost pa je enaka nič. Tukaj x v enačbi (6) predstavlja kot, ki ga prištejemo kotu, ki predstavlja trenutno smer protona. Iz enačbe (2) je razvidno, da je standardna deviacija večja, čim manjša je hitrost protona. To pomeni, da se sprva smer protona pri vstopu v nov kvadrata minimalno spreminja, proti koncu poti pa so odkloni večji in snop se močneje razprši. Iz znane smeri se izračuna dolžina poti protona v trenutnem kvadratu in nato še izguba energije v njem. Vsakemu kvadratu ustreza številčna vrednost v tabeli simulacije, kjer se seštevajo energije. Postopek se za vsak proton ponavlja, dokler ne izgubi na poti vse energije. Na koncu simulacije, po tem, ko smo izstrelili veliko število protonov, lahko iz tabele ugotovimo, kje so protoni izgubljali največ energije in kje so se zaustavili.

Število protonov v simulaciji smo postavili na 100.000. Pri rezultatih z večjim številom protonov skoraj ni bilo opaznih razlik v dosegu. Ker se relativna napaka v statistiki meri s korenom števila ponovitev, deljenim s številom ponovitev, smo relativno napako simulacije ocenili na 0,3 %. Pri tem številu protonov simulacija za vse izračune potrebuje približno dve minuti.

4 Rezultati in diskusija

4.1 Doseg protonov v odvisnosti od kinetične energije

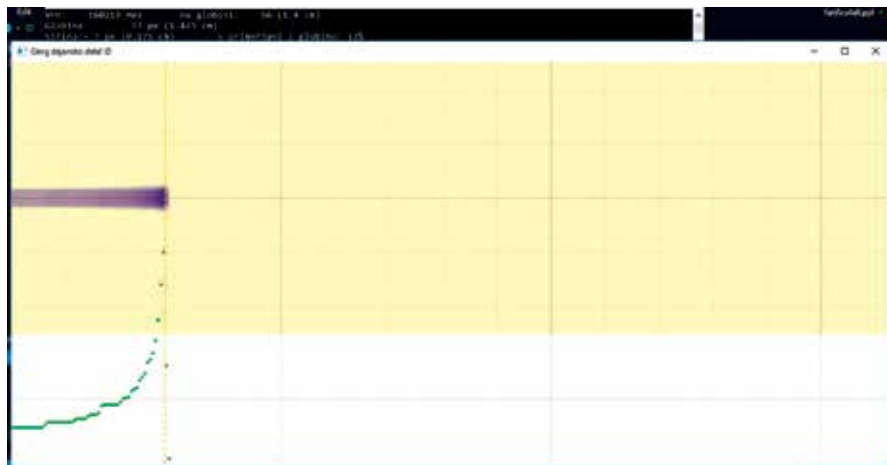
Izbrana snov je bila voda, začetno energijo protonov pa smo povečevali po 10 MeV od 30 MeV do 100 MeV. Po pričakovanjih je bil doseg daljši pri večji začetni energiji. Na slikah 5, 6, in 7 so prikazani rezultati simulacij pri začetnih energijah 40, 70 in 100 MeV.

Grafično okno je razdeljeno na zgornji in spodnji del. V zgornjem delu je prikazana snov v obliki svetlo rumenega pravokotnika, z odtenki modre barve pa količina absorbirane energije v njej (kolikor temnejše je, toliko več energije je snov tam absorbirala). S črtkano oranžno črto je prikazan tudi doseg snopa protonov. Za lažjo vizualno oceno dosega so šibkejšje pomožne črte postavljene na vsakih 0,5 cm, debelejšje pa na vsakih 2,5 cm. Na spodnjem delu je graf absorbirane energije v odvisnosti od globine. Ena točka na grafu predstavlja energijo, ki se absorbira v pravokotniku snovi z dolžino 1 korak (0,25 mm) in širino 4 korake (1,0 mm). Ti pravokotniki s površino 0,25 mm² predstavljajo snov v osrednjem milimetru protonskega snopa.

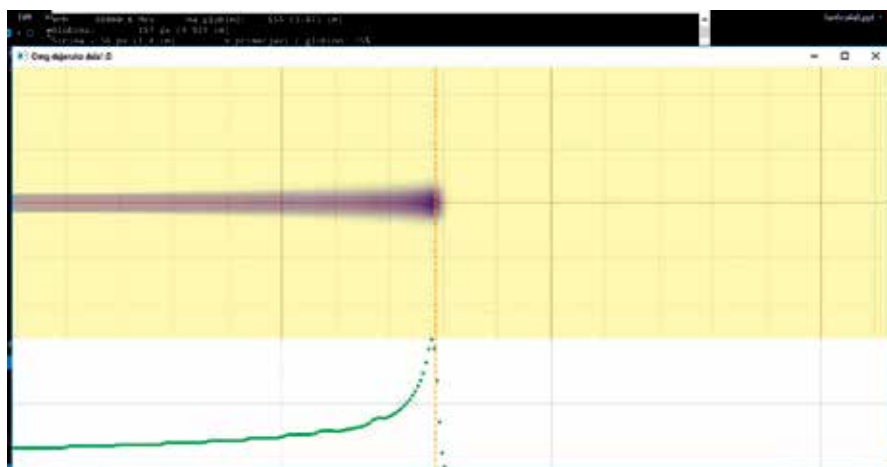
Na koncu simulacije, po tem, ko smo izstrelili veliko število protonov, lahko iz tabele ugotovimo, kje so protoni izgubljali največ energije in kje so se zaustavili.

Braggov vrh je tam, kjer se nahaja pravokotnik z največ absorbirane energije znotraj njegove površine, zato je enota na ordinatni osi MeV / 0,25 mm². Doseg snopa, vrednost energije v vrhu in globina, pri kateri vrh nastane, se izpišejo tudi v črnem okvirju nad grafičnim oknom.

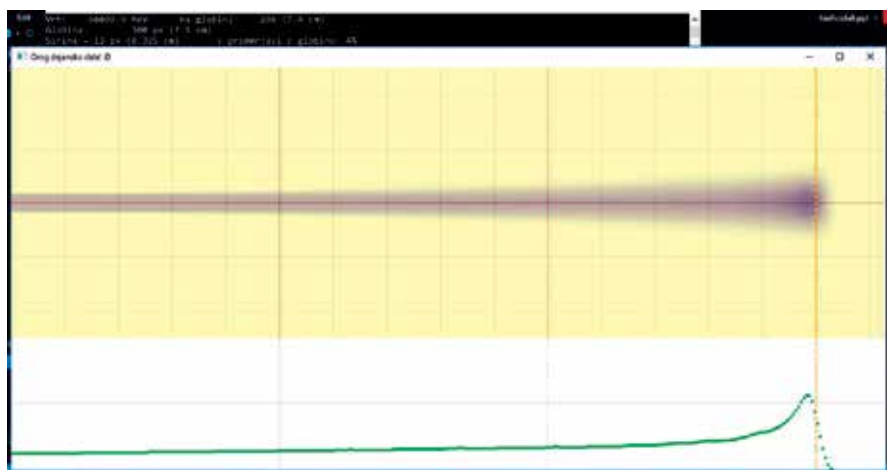
Braggov vrh je tam, kjer se nahaja pravokotnik z največ absorbirane energije znotraj njegove površine, zato je enota na ordinatni osi MeV / 0,25 mm².



Slika 5: Snop protonov z začetno energijo 40 MeV. Doseg je 1,43 cm, Braggov vrh je na globini 1,40 cm pri absorbirani energiji 160.200 MeV / 0,25 mm².

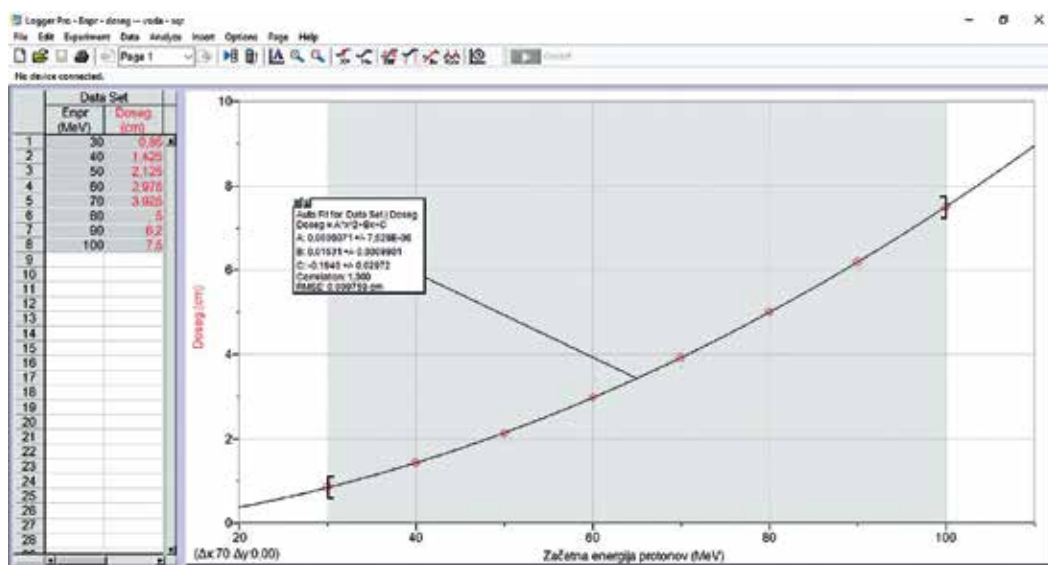


Slika 6: Snop protonov z začetno energijo 70 MeV. Doseg je 3,93 cm, Braggov vrh je na globini 3,88 cm pri absorbirani energiji 98.900 MeV / 0,25 mm².



Slika 7: Snop protonov z začetno energijo 100 MeV. Doseg je 7,5 cm, Braggov vrh je na globini 7,4 cm pri absorbirani energiji 56.700 MeV / 0,25 mm².

Iz posameznih simulacij smo razbrali podatek o dosegu snopa. Te podatke smo nato vstavili v tabelo v programu LoggerPro, kjer se je izrisal graf globine (cm) v odvisnosti od začetne energije (MeV). Ta program omogoča prilagajanje funkcij točkam na grafu. Na sliki 8 je prilagoditvena funkcija kvadratna.



Slika 8: Kvadratna funkcija, ki se najboljše prilega podatkom.

Doseg protonskega snopa kinetične energije 100 MeV po podatkih v literaturi znaša 7,7 cm (vir 2), rezultat naše simulacije pa je 7,5 cm. Natančnost uporabljene metode tako lahko ocenimo z relativno napako približno 3 %.

Pri grafih absorbirane energije na enoto ploščine v centru snopa (spodnji deli slik od 5 do 7) prva odebeljena vodoravna črta predstavlja vrednost $50.000 \text{ MeV} / 0,25 \text{ mm}^2$. S teh grafov je razvidno, da protoni takoj po vstopu v snov počasi izgubljajo energijo (absorpcija energije je v snovi tam majhna), ko jim kinetična energija pada, pa je absorbirane energije v snovi vse več. Pri kinetični energiji pod 1 MeV sledi Braggov vrh in na kratki razdalji, ki se meri v milimetrih, se zaustavijo vsi protoni. Kolikor večja je kinetična energija protonov, toliko počasneje izgubljajo energijo in posledično nesorazmerno dalj časa potujejo z večjo hitrostjo. Zato se pot in s tem doseg povečuje bolj, kot to določa linearna funkcija. Presenetljivo dobro se z našimi rezultati za vodo ujema kvadratna funkcija.

Kolikor večji je doseg, toliko širši in manj izrazit je Braggov vrh. To lahko razložimo z razpršitvijo snopa, ki se z dosegom povečuje. Pri 40 MeV je največ sproščene energije v krogu premera 1,75 mm, pri 100 MeV pa v krogu premera 3,25 mm. To je skoraj 3,5-krat večja površina, skupna energija pa je večja le za faktor 2,5. Poleg tega se več energije izgubi že pred vrhom, in sicer zaradi daljše poti protonov v snovi.

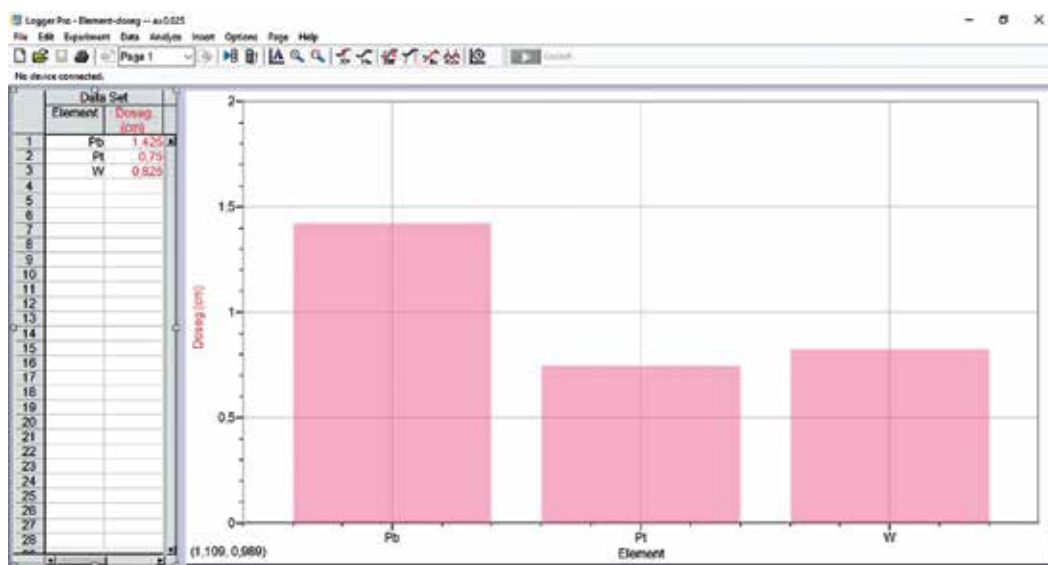
4.2 Svinec kot najboljša zaščita pred protoni

Ker se pri rentgenskem slikanju kot zaščitni material uporablja svinec, smo preverili, ali je ta material najučinkovitejši tudi pri zaščiti pred protoni. Za primerjavo smo izbrali volfram in platino, ker imata tako kot svinec veliko vrstno število, hkrati pa imata večjo gostoto od njega. Rezultati na sliki 9 kažejo, da imajo protoni z začetno kinetično energijo 100 MeV v svincu doseg samo 1,425 cm, to je petkrat manj kot v vodi, ampak doseg v platini je še dvakrat krajši, samo 0,75 cm. Tudi volfram učinkovito zaustavlja protone, doseg je le 0,825 cm.

Protoni večino energije izgubijo v reakcijah z elektroni. Če je gostota elektronov v snovi velika, potem protoni hitreje izgubljajo energijo, saj pride do več interakcij na enoto dolžine. Gostota elektronov v snovi je odvisna od vrstnega števila atomov, ki snov sestavljajo, ter od gostote snovi (kolikor višja je gostota, toliko bolj so atomi nagnjeni drug ob drugem). Svinec ima vrstno število 82 in gostoto $11,35 \text{ kg/dm}^3$, platina pa ima vrstno število 78 in gostoto $21,45 \text{ kg/dm}^3$. Pri podobnem vrstnem številu ima platina skoraj dvakrat večjo gostoto, zato je doseg protonov skoraj dvakrat krajši.

S teh grafov je razvidno, da protoni takoj po vstopu v snov počasi izgubljajo energijo (absorpcija energije je v snovi tam majhna), ko jim kinetična energija pada, pa je absorbirane energije v snovi vse več.

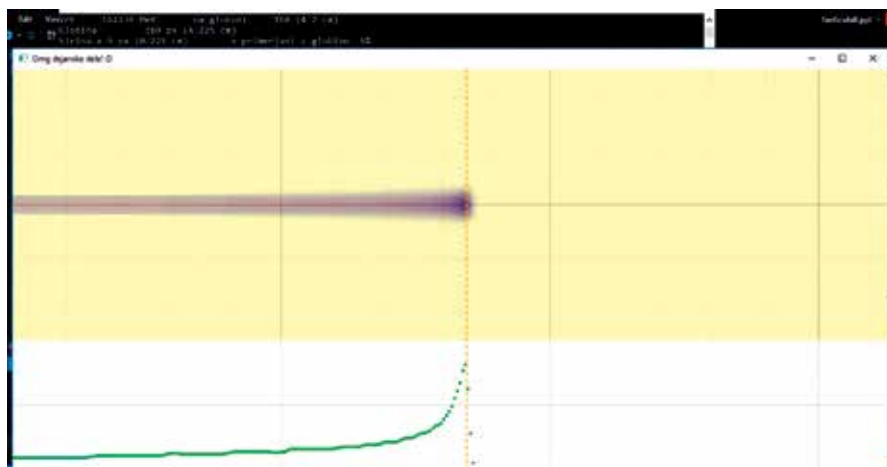
Protoni večino energije izgubijo v reakcijah z elektroni. Če je gostota elektronov v snovi velika, potem protoni hitreje izgubljajo energijo, saj pride do več interakcij na enoto dolžine.



Slika 9: Primerjava globlin snopov protonov z začetno energijo 100 MeV v svincu, platini in volframu.

4.3 Doseg protonov v snoveh, ki tvorijo človeško telo

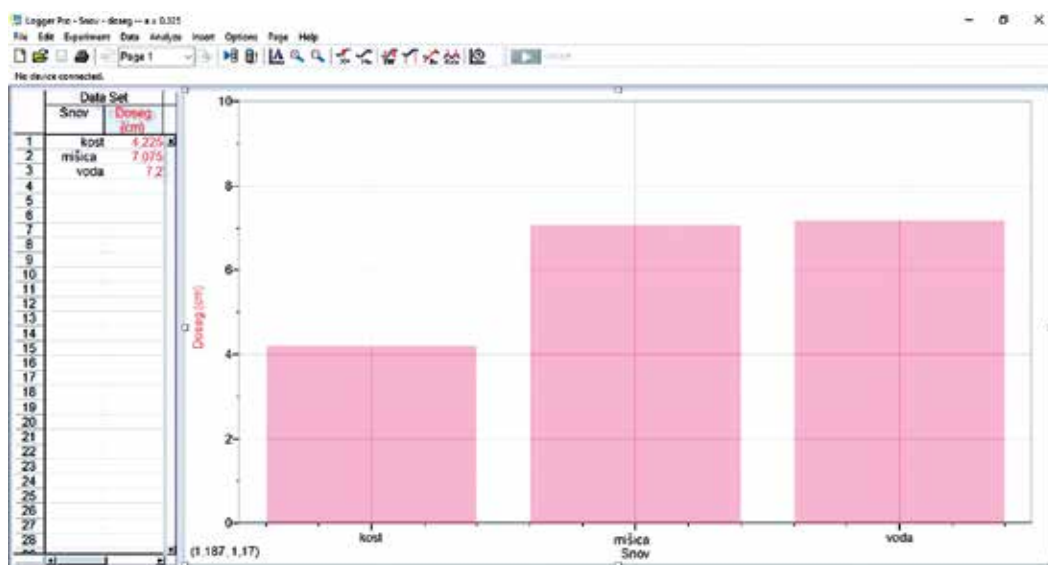
Raziskali smo še, kako je z doseg protonskih snopov v bioloških materialih (kost, mišica, voda). Rezultati simulacije za kost in mišico so na slikah 10 in 11, za vodo pa na sliki 7.



Slika 10: Doseg snopa protonov z začetno energijo 100 MeV v kosti (na grafu za absorbirano energijo je prva odebeljena črta pri vrednosti 100.000 MeV / 0,25 mm²).



Slika 11: Doseg snopa protonov z začetno energijo 100 MeV v mišici (na grafu za absorbirano energijo je prva odebeljena črta pri vrednosti 200.000 MeV / 0,25 mm²).



Slika 12: Primerjava dosegov snopov protonov z začetno energijo 100 MeV v kosti, mišici in vodi.

Že na prvi pogled je vidno, da ima snop protonov v kosti najkrajši doseg. Dosega snopov protonov v mišici in vodi pa sta precej podobna. Podatki so pokazali, da ima snop protonov v mišicah vseeno krajši doseg kot snop protonov v vodi (razlika med dosegi je 1,25 mm). Najpogostejša elementa v kosteh sta kisik in ogljik, v znatnem deležu pa najdemo tudi kalcij in fosfor z višjima vrstnima številoma. Poleg tega je gostota kosti $1,85 \text{ kg/dm}^3$, kar je precej več od gostote mišice ($1,04 \text{ kg/dm}^3$) in vode ($1,0 \text{ kg/dm}^3$). Zato je kratek doseg protonov v kosti pričakovan. Mišice so večinoma sestavljene iz naslednjih elementov: kisik, ogljik in vodik, vsi so z začetka periodnega sistema. Zato med mišico in vodo, ki je iz kisika in vodika, ni posebne razlike. Ker sta tudi gostoti mišice in vode skoraj enaki, sta posledično tudi dosega protonskih snopov skoraj identična.

5 Zaključek

Protonom se v izbrani snovi pri naraščajočih začetnih energijah doseg povečuje. Ta v odvisnosti od začetne energije ne narašča linearno, ampak s kvadratno funkcijo.

Med preučevanimi kovinami za zaščito se je kot najboljša izkazala platina, takoj za njo pa je bil volfram z razliko le 0,75 mm pri začetni energiji 100 MeV. Še nekoliko bolje od platine bi se lahko izkazal osmij z vrstnim številom 76 in največjo gostoto $22,57 \text{ kg/dm}^3$. Vendar pa svinec tu primerjamo z zelo redkimi in dragocenimi kovinami. Svinec je dostopen tako po količini kot po ceni in je zato še vedno uporaben kot zaščita pred protoni.

Pri preučevanju snovi, ki jih najdemo v človeškem telesu, je presenetil skoraj identičen doseg protonov v mišici in vodi. »Protonsko slikanje« bi tako dalo podoben kontrast kot rentgensko slikanje: kosti bi se ločile od vseh drugih tkiv in tekočin v telesu.

Uporabljeni model izračunavanja dosega protonov v snovi ima seveda svoje pomanjkljivosti, a je precej enostaven in ne zahteva natančnega poznavanja interakcij med kvantnimi delci. Če nas zanima natančnejša obravnava gibanja posameznega protona skozi snov, se je treba zateči k metodam Monte Carlo (kratko MC). Z metodami MC pridemo do numeričnih rešitev fizikalnih problemov, ko je preverjanje z merjenji nemogoče (kot je nemogoče izmeriti hitrost protona po vsakem trku v snovi). Na trgu je več paketov MC, ki obravnavajo transport radiacije v snovi in omogočajo spremljanje vseh pomembnih fizikalnih količin v realni geometriji. A potrebujemo dobre računalniške zmogljivosti, saj simulacije že v enostavnih geometrijah, kot je vodni cilindri, v povprečju trajajo tisoč minut (vir 2).

Podobno kot protoni se v snovi obnašajo tudi drugi težji ioni, ki bi lahko imeli še bolj uničevalen učinek na tumorje. Raziskave z ioni helija in ogljika kažejo, da predvsem slednji tako

Že na prvi pogled je vidno, da ima snop protonov v kosti najkrajši doseg. Dosega snopov protonov v mišici in vodi pa sta precej podobna.

Raziskave z ioni helija in ogljika kažejo, da predvsem slednji tako poškodujejo rakaste celice, da se te ne morejo več obnoviti in propadejo.

poškodujejo rakaste celice, da se te ne morejo več obnoviti in propadejo. Terapija z ioni ogljika bi v prihodnosti lahko bila optimalna izbira za zdravljenje nekaterih vrst tumorjev (vir 3).

Ta članek je povzetek raziskovalne naloge z naslovom »Pot protonov v snovi« (vir 9), ki je bila izdelana na Gimnaziji Velenje in predstavljena v okviru gibanja Mladi raziskovalci v šolskem letu 2018/19. Avtorica se je pogumno odločila za raziskavo, za katero je bilo treba izdelati računalniško simulacijo. Želja, da se nauči osnov programiranja v C++, je bila dodatna motivacija za uspešen zaključek.

Viri in literatura

- [1] Bon Klanjšček, M., Felda D. (2012). Matematika 4: učbenik za gimnazije. Ljubljana: DZS.
- [2] Bozkurt, A. (2017). Monte Carlo calculation of proton stopping power and ranges in water for therapeutic energies, EPJ Web of Conferences **154**, 01007.
- [3] Cirilli, M. (2018). From particle physics to medtech and biomedical research. EPN 49/5&6.
- [4] Leo, W. R. (1987). Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How to Approach. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.
- [5] Mohorič, A. (2014). Fizika 3: učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol. Ljubljana: Mladinska knjiga.
- [6] Newhauser, W. D., Zhang, R. (2015). The Physics of Proton Therapy. IoP Publishing, Philadelphia.
- [7] Paganetti, H. (2017). Proton Beam Therapy. IoP Publishing, Philadelphia.
- [8] Razdevšek, G. (2018). Simulacija doze pri protonski terapiji v dinamični geometriji. FMF – Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana.
- [9] Vipavc, N. (2019). Pot protonov v snovi. Šolski center Velenje – Gimnazija, Velenje.
- [10] NIST (National Institute of Standards and Technology). www.physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html (23. 12. 2018).
- [11] PDG (Particle Data Group). <http://pdg.lbl.gov/2019/AtomicNuclearProperties/index.html> (5. 1. 2019).
- [12] Proton Therapy, Wikipedia. www.en.wikipedia.org/wiki/Proton_therapy (18. 1. 2019).